

報告 ニッケル被覆炭素繊維シートを用いた電気防食工法の開発

中村 雅之^{*1}・小林 俊秋^{*2}・井川 一弘^{*3}・篠田 良央^{*3}

要旨：ニッケル被覆した炭素繊維シートを陽極材に用いて新しい電気防食工法を開発した。陽極設置の施工性を改善した外部電源方式の電気防食工法である。炭素繊維にニッケルを被覆して陽極材としての長期耐久性を確保し、高アルカリ水溶液を含ませた吸水性高分子ポリマーをバックフィル材として使用し陽極性能を維持している。塩害を模擬した鉄筋コンクリート供試体に本方式の電気防食を行ない、1年間にわたって通電し良好な結果を得て実用的な電気防食工法であることを確認した。

キーワード：電気防食, ニッケル被覆炭素繊維シート, バックフィル

1. はじめに

電気防食工法は、新たに設置した陽極からコンクリートを介して鋼材に微弱な電流を流して、腐食反応を停止させる工法である。コンクリート中の塩化物イオン量の過多に左右されない防食工法である。

電気防食工法は、面状陽極方式、線状陽極方式、点状陽極方式の3つに分類される。電気防食工法の施工は、陽極の設置が主要な工種である。線状陽極方式・点状陽極方式では、コンクリートに切削あるいは削孔して陽極材を埋め込み、モルタルやバックフィルで充填する、面状陽極方式では、コンクリート表面に陽極材を固定しモルタルで被覆する、という施工である。この際、コンクリート表面の金属探査および短絡処理などの入念な施工が必要となる。

電気防食は通電時の電気化学反応により陽極材から酸素や塩素ガスが発生する可能性がある。ガスの発生は陽極材近傍のコンクリートや陽極材を劣化させ、その結果、抵抗が上昇し電気防食の機能が低下する可能性がある。

陽極設置にかかわる探査や短絡処理を不要とし、陽極の寿命を左右するガスの発生をなくした、新しい電気防食工法を開発した。ニッケル被覆炭素繊維シートを陽極材に用いた電気防食

工法である。本報告では、本工法の施工性および防食効果を検証する目的でおこなった供試体における試験結果について報告する。

2. 本工法の特長

2.1 炭素繊維シートを用いた電気防食工法

本工法は、陽極材にニッケル被覆炭素繊維シートを用いた外部電源方式の電気防食工法である。陽極の構成図を図-1に示す。

陽極システムはFRP製保護カバー内にニッケル被覆炭素繊維シート陽極を配置し、バックフィルを充填している。以下に電気防食システムを構成する各材料について説明する。

(1) ニッケル被覆炭素繊維シート

陽極材として使用するものは、繊維1本1本にニッケルを均一に被覆した炭素繊維シート（ベスファイト MC-W3101）である。炭素繊維の優れた耐久性・経済性と、ニッケルの持つ高い導

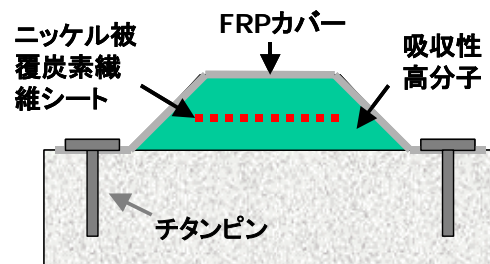


図-1 陽極の構成図

*1 オリエンタル建設(株) 本社第一技術部メンテナンスチーム 主任研究員(正会員)

*2 オリエンタル建設(株) 技術研究所 主任研究員(正会員)

*3 (株)ナカボーテック 本店港湾・橋梁事業部RC技術部 課長(正会員)

電性・耐久性を兼ね備えた高性能陽極である。炭素繊維の主原料はPAN（ポリアクリロニトリル）である。表-1 にニッケル被覆炭素繊維シートの特性を示す。炭素繊維の直径は7.5 μ mであり、3000本で1本の糸を構成する。繊維一本毎に平均0.25 μ mの厚さのニッケルを被覆している。25mm幅あたり12.2本の糸で平織りシートを構成し、比表面積は70 m²/kg程度である。この大きな表面積により、陽極材として安定した電流を流すことができる。陽極材に使用する炭素繊維シートの寸法は、幅6cm、厚さ0.25mmである。写真-1 にニッケル被覆炭素繊維シートを示す。

炭素繊維をニッケルで被覆しているため陽極としての長期耐久性が確保されている。NACE（米国腐食防食協会）の陽極耐久性試験¹⁾を参考とした方法により陽極材の耐久性を確認している。これは、110mA/m²の電流を40年間継続して通電した場合の積算電流量を、コンクリート環境を模擬した水溶液に浸けた陽極材に通電して、耐久性を評価するものである。同等の積算電流量は8.9A/m²の電流を180日間通電して得られ、陽極の電位変化量が4V以下の場合に合格である。

(2) バックフィル

バックフィルは、高アルカリ溶液をポリアクリル酸塩系高吸水ポリマー（アクペックHV501ER）に吸収させて成形したもので、通電機能に必要なイオン伝導性を維持する。高アルカリ水溶液は18%の水酸化ナトリウムを使用した。ペーハーはpH=14である。水溶液と高分子の比は20:1である。写真-2 に水酸化ナトリウム水溶液吸収させたバックフィル材を示す。

(3) FRP製保護カバー

ガラス繊維で強化された不飽和ポリエステル

樹脂（FRP）を波板状に成形したもので耐食性・耐候性に優れている。炭素繊維シート陽極とバックフィル材をコンクリート表面に固定し、これを保持してバックフィルの乾燥を防止する。

写真-3 にFRP製保護カバーを示す。



写真-1 ニッケル被覆炭素繊維シート

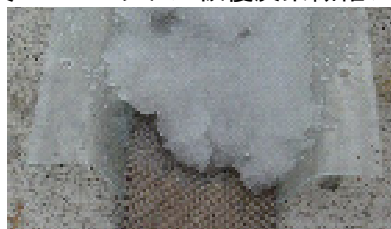


写真-2 高分子バックフィル



写真-3 FRP製保護カバー

2.2 工法の特長

(1) コスト縮減

炭素繊維シートを用いた電気防食工法は、炭素系材料を陽極の基材として用いているため、白金系の貴金属を被覆したチタン系材料を基材とした陽極等と比較して経済的である。

(2) 構造物への負担軽減

既設構造物に施工する場合、コンクリートドリルなどを使用して、コンクリート表面に陽極固定用の孔を削孔してプラグを設置するだけである。コンクリート構造物に対して断面欠損などがなく負担が小さい。

(3) 施工の省力化

コンクリート中の鋼材が陽極と短絡した場合、1)鋼材が陰極になることが出来ず電気防食が達

表-1 ニッケル被覆炭素繊維の特性

	シート			フィラメント数	Ni平均被膜厚 μ m	繊維直径 μ m	織度tex	引張強度MPa	引張弾性厚Gpa	伸度%	密度g/cm ³	体積抵抗率ohm.cm
	密度(本/25mm)たて	よこ	重さg/m ²									
ニッケル被覆炭素繊維シート	12.2	12.2	355	3000	0.25	7.5	360	2744	215	1.2	2.7	7.5 x 10 ⁻⁵
Ni	-	-	-	-	-	-	-	314	206	30	8.9	6.0 x 10 ⁻⁶

成しされない、2)鋼材が陽極になり著しい腐食が起こる、の2つの障害が発生する。コンクリートかぶり部分にある番線・結束線・釘・形鋼などが陽極と短絡すると、これらがアノードとなり著しい腐食を起こす。よって陽極の設置前に、かぶりの薄い鋼材の探査や露出金属の探査、これらを電氣的に絶縁する処置や露出金属の除去などの短絡処理が必要となる。本方式では、バックフィルが陽極を包囲するので露出金属に接触する事がなく短絡処理が不要となる。

(4) 死荷重の増加を低減

陽極をバックフィル材とともに FRP 製保護カバー内に収め、コンクリート表面に設置するために、モルタル被覆などに比べて死荷重の増加を抑えることができる。同じ線状陽極方式のチタンリボンメッシュ陽極方式に比べると、若干の重量増となるが、面状陽極のチタンメッシュ陽極方式に比べると大幅な重量減となる。チタンメッシュの場合 10~20mm のモルタルで被覆するため重量増が 20~50kg/m²となる。本方式の場合、FRP 製保護カバー・ニッケル被覆炭素繊維シート・バックフィルの重量の合計が 2.2kg/m、配置間隔を 300mm とすれば 7.3kg/m²となり、被覆モルタルの場合の 1/2~1/6 程度となる。従って構造物に大幅な負担をかけない。

(5) ガス発生回避

電気防食では、陽極反応で発生するガスが陽極の劣化を促進する。炭素繊維に被覆したニッケルは、酸素の発生電位が低いために、酸素ガスを発生させることがなく、塩素ガスや二酸化炭素も発生しない。

3. 供試体試験

3.1 供試体

(1) 供試体の形状およびコンクリートの配合

供試体の形状寸法を図-2 に示す。軸方向鉄筋として 8-D25、スターラップとして D13ctc100

を配置した。鉄筋の純かぶりは 35mm とした。表-1 使用材料、表-2 にコンクリートの配合を示す。塩分として、塩化物イオン濃度が 7.5 kg/m³ となるように 12.4 kg/m³ の塩化ナトリウムを添加した。

表-2 供試体使用材料

リ コ ン ク リ ー ト	セメント	普通ポルトランドセメント
	細骨材	岩瀬産砕砂
	粗骨材	岩瀬産2005碎石
	混和剤	メラミンスルホン酸系
	塩化物	塩化ナトリウム NaCl
陽 極 材	炭素繊維シート	ニッケル被覆 PAN型二方向織物
	バックフィル	水酸化ナトリウム水溶液 ポリアクリル酸系水溶性 樹脂高分子
FRP製保護カバー	ガラス繊維補強 不飽和ポリエステル樹脂	
照合電極	鉛電極	
鉄筋	SD295A D13	

表-3 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	混和剤	NaCl
65	45	180	277	860	1067	5.0	12.4

(2) 養生履歴

打設後、100 日間自然養生とした。その後、塩水噴霧(模擬海水:塩化ナトリウム3%水溶液)4日間・乾燥3日間を1サイクルとする乾湿繰返し養生を82サイクルおこなった。その後通電まで、約73週自然暴露とした。

(3) 供試体劣化状況

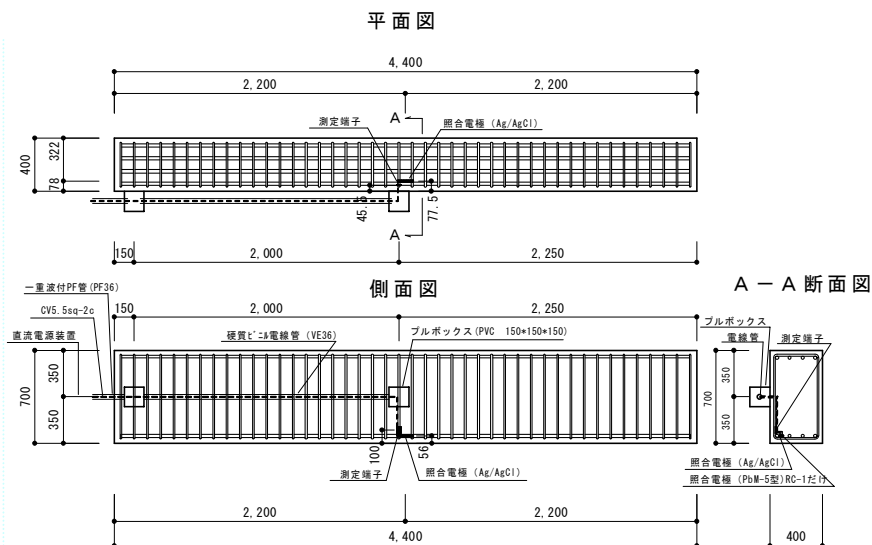


図-2 供試体図

供試体表面に、腐食ひび割れが多数発生し、ひび割れからは錆汁が見られた。土木学会コンクリート標準示方書維持管理編の定義では、塩害劣化のグレーディングとして、加速期に相当した。

(4)自然電位の測定

試験体の自然電位の分布を図-3に示す。測定は日本防食工業社製電位センサーPE-01型回転式鉛照合電極を使用しておこなった。測定結果は、-488 から -722mV vsCSE の範囲であった。表-4に示す ASTM の判定基準²⁾から、「90%以上の確率で腐食あり」と判定した。

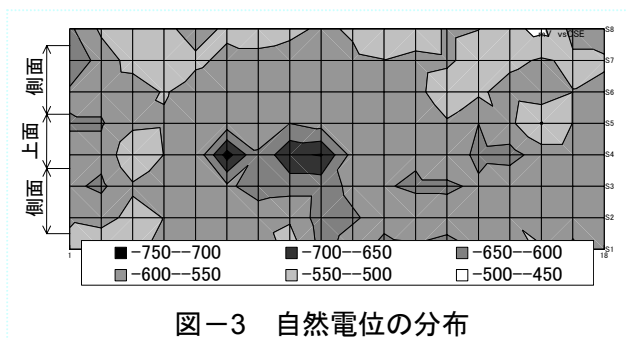


図-3 自然電位の分布

表-4 ASTM の判定基準²⁾

自然電位 E (mV vs CSE)	腐食の確率
$E > -200$	90%以上の確率で腐食無し
$-200 \geq E > -350$	不確定
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり

表-5 CEB の腐食速度の判定基準³⁾

分極抵抗 R_{cr} ($k\Omega cm^2$)	腐食速度の判定
130~260より大	不動態状態(腐食なし)
52以上130以下	低から中程度の腐食速度
26以上52以下	中から高程度の腐食速度
26未満	激しい・高い腐食速度

(5)分極抵抗の測定

分極抵抗の測定は、照合電極と2つの対極を組み合わせた2重対極センサーを用いて、高低2周波の交流インピーダンス値から分極抵抗を求める方式とした。分極抵抗の測定結果は、43 $k\Omega cm^2$ という数値であった。表-5に、CEBの腐食速度の判定基準を示す。分極抵抗と腐食速度の関係から「中から高程度の腐食速度」と判定された。なお測定器は四国総合研究所社製のSRI-CMIIを用いた。

3.2 本工法の施工手順

図-4に供試体の概要を示す。

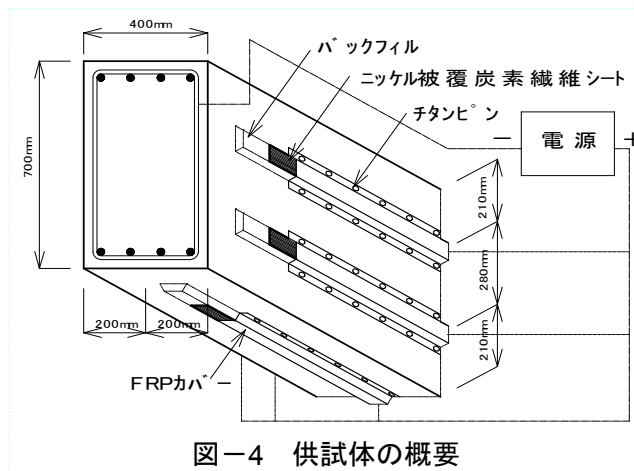


図-4 供試体の概要

(1)陽極設置前処理工

劣化部のコンクリートのはつり・表面処理を行なう。次に、コンクリート中の鋼材が電氣的に一体化していることを確認する。コンクリート中の鋼材に一定間隔で通電点や照合電極を設置し、断面欠損部の断面修復を行なう。

(2)バックフィル充填工

FRP製保護カバーに、陽極を設置して陽極の周囲にバックフィルを充てんする。

(3)絶縁用チューブ挿入

コンクリート表面に陽極固定用の孔を削孔し、削孔した孔に固定用絶縁用チューブを挿入する。

(4)陽極設置工

陽極とバックフィルを充てんしたFRP製保護カバーをコンクリート表面にセットし、削孔した孔にチタンピンを挿入して固定する。

(5)各陽極間の導通確保

チタン製プレート2枚により端部の陽極を挟み込んで圧着して陽極に電流を分配する通電点を設置し、プルボックス内に収納する。

(6)目地および端部処理

FRP製保護カバーの目地部と端部にシーリング材を用いて防水処理を行なう。

(7)防食回路形成工

ビニル製のボックスや樹脂製配管材を使用して配線・配管を行なう。写真-4に電気防食システムを設置した供試体の全景を示す。電気防食システムに異常がないことを確認し、通電試験

をおこないに必要な防食電流量を決定する。

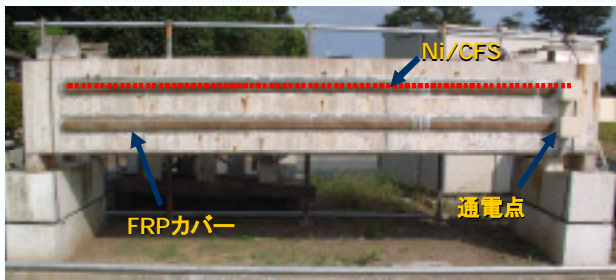


写真-4 供試体全景

3.3 通電試験

(1)分極試験 (E - log I 試験)

分極量試験は土木学会電気化学的防食工法の設計施工マニュアルに示す防食基準を満たす防食電流量を決定するためにおこなう。防食基準は鋼材の電位をマイナス方向へ 100mV 以上変化させることを基本とする。分極量試験では、設置した陽極から鋼材へ向けてさまざまな電流を流し、これを小から大へ変化させて、電流と鋼材電位の関係から、防食基準を満たす防食電流量を決定する。通電は各 10 分間である。図-5 に分極試験結果を示す。分極試験結果より防食電流密度は 10mA/m²と決定した。電気防食対象面積が 6.84 m²であるので、電気防食システムの防食電流として 6.9mA の一定値に決定した。

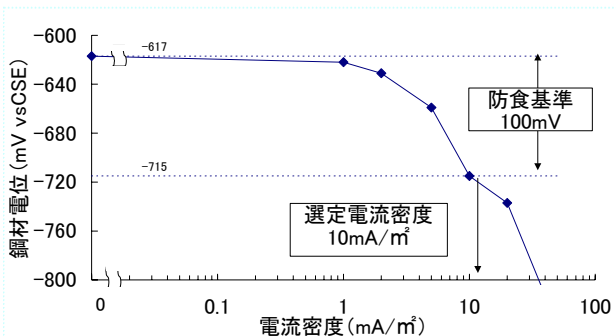


図-5 分極試験結果【E - log I 試験】

4. 試験結果

4.1 施工性

本工法の施工性を従来工法と比較すると、1) コンクリート表面処理が簡易であり、2)短絡防止処理が不要で、3)陽極の設置作業が迅速にできる、ことから本工法の施工に要する労力はチタンリボン陽極方式の 4~6 割、チタンメッシュ陽極方

式の 5~7 割であることが確認できた。表-6 に歩掛りの比較表を示す。

表-6 施工歩掛りの比較表

	陽極設置工歩掛 (陽極設置面積10m ² 当り)		
	ニッケル被覆 炭素繊維 シート方式	チタンリボン メッシュ方式	チタン メッシュ方式
作業人員	10.7 人	18~26人	15~20人

4.2 防食効果確認試験結果

(1) 鉄筋電位の推移

鋼材電位の推移を図-6 に示す。各電位とも急激な変化がなく電気防食システムとして概ね安定しているといえる。OFF 電位は通電停止 4 時間後の値である。これを見ると通電初期に -617mVvsCSE 程度であったものが-517mVvsCSE に 100mV ほど貴側へ推移している。表-4 に示す ASTM の判定基準では、「90%の確立で腐食なし」の範囲には入っていないものの防食環境へ変化しつつことがわかる。変化量が少ない理由は試験体の腐食環境が厳しい状態であったものと考えられ、今後通電期間が長くなるにしたがって OFF 電位が貴側へ変化していくと思われる。

(2) 復極量試験結果

復極量の推移を図-7 に示す。復極量はインスタント OFF 電位と 4 時間後の OFF 電位の差である。分極試験により決定した電流を一定電流とし試験体に与え、適時復極量を測定した。通電初期において 100mV を下回っていたが、通電 100 日を越えてからは 100mV を超えて上昇し、防食基準である 100mV 以上を続けており、防食効果が確認できている。

(3) 分極電位の推移

分極電位の推移は、防食電流量を決定した分極試験を、通電 2 ヶ月、通電 18 ヶ月についてもおこない、プロットしたものである。結果を図-8 に示す。電流密度 1mA/m²までの分極曲線の傾きは通電前に比べて大きくなっている。少ない電流密度で分極量が大きくなることがわかる。

これは鉄筋腐食の電気化学反応が起こりにくいことを表している。すなわち18ヶ月間の通電によって、全体的に鋼材の電位が貴側へ移動しており、鉄筋の腐食抑制され防食効果が得られたこと示している。

(4) 分極抵抗の推移

通電前と通電18ヶ月の分極抵抗値の推移を図-9に示す。分極抵抗の値は通電停止24時間後に計測した。通電前の分極抵抗値 $43\text{k}\Omega\text{cm}^2$ が18ヶ月後に $135\text{k}\Omega\text{cm}^2$ に推移している。「中から高程度の腐食速度」と判定された状態が「不動態状態（腐食なし）」と判定される状態となった。

(5) 通電電圧の推移

陽極システムの通電電圧の動きと外気温を図-10に示す。1.0Vから1.5の間で推移し、概ね安定している。外気温が低い期間に電圧が上昇し外気温が上昇すると電圧が下降する関係が見られる。

5. まとめ

本試験の範囲内において、以下の結論が得られた。

(1) 本方式による陽極システムは、コンクリート躯体に切削・削孔・吹付け等で金属製陽極を埋め込む一般的な電気防食工法に比べ、作業工程が簡略で作業の省力化が可能である。

(2) 塩害を模擬した供試体に通電し、本方式による陽極システムによって電気防食に必要な電流が鋼材に供給されること確認した。

参考文献

- 1) NACE Standard TM0294-94 Item No.21225
- 2) ASTM V876-87 : Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel Concrete, 1980
- 3) CEB Working Party V/4.1: Strategies For Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft),BBRI-CSTC-WETCB,Dec.1997

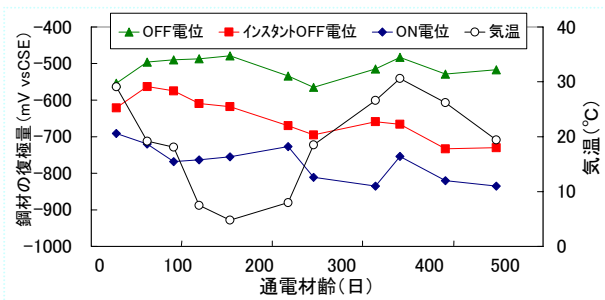


図-6 鋼材電位の推移

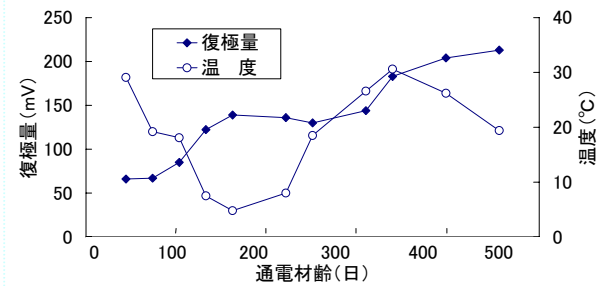


図-7 復極量の推移

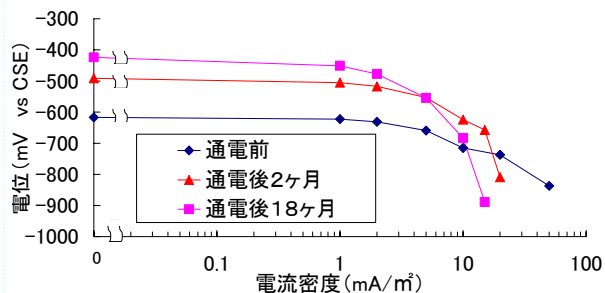


図-8 分極電位の推移

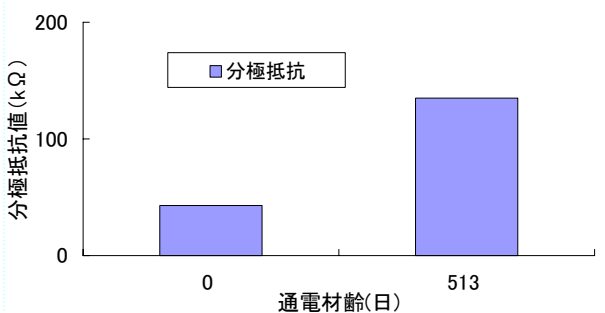


図-9 分極抵抗値の推移

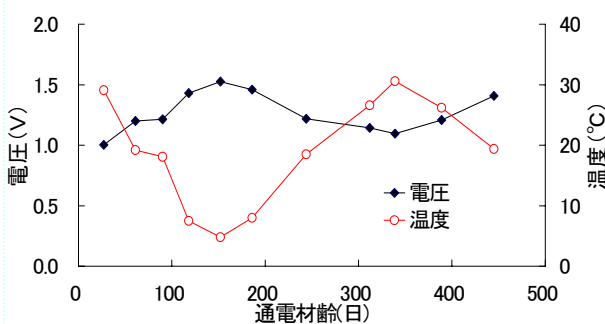


図-10 通電電圧の推移